

## 融化水移除於融冰冷度釋放系統之熱傳效率改善

### The Improvements of Heat-Transfer Efficiencies in Cool-Thermal Discharge Systems with Complete Removal of Melt

計劃編號: NSC 89-2214-E-032-014

執行期限: 89/08/01~90/07/31

主持人: 何啓東 淡江大學化工系 教授

#### 一、中文摘要(關鍵詞: 冷度釋放、融冰系統、移動邊界條件)

融冰冷度儲存與釋放的系統是利用夜間離峰時段製冰，然後在白天尖峰時段融冰，以獲得適冷空調系統的方法，因此，提高發電設施的經濟效益。

本研究設計一個更佳熱傳效率的融冰冷度釋放系統。為了增加熱傳效率，本系統是探討由外界供給一固定熱通量的冷度釋放問題，並將融冰後產生的融化水移除，以降低融冰系統中水層的熱阻，如此便能增加系統能量的釋放，使融冰效率一直維持在最大值，同時移除後的融化水更可充當冷卻水之用途。

利用熱輸送與能量平衡之分析，吾等可推導出在特定的系統下，利用空氣直接通過冰層表面以產生冷空氣，所需空氣質量流率的方程式，同時也可得到冷空氣之出口溫度。

英文摘要:(Keywords: Cool thermal discharge; Ice melting; Moving boundary)

The cool-thermal storage system is the process of ice making during off-peak periods while the cool-thermal discharge system is that of ice melting during on-peak periods and to supply on-peak daytime air-conditioning needs. Therefore, the system of cool-thermal storage and discharge contribute to improve load management and thus make good economic sense.

A more efficient device in energy transfer for cool-thermal discharge system has been designed. The modeling equations have been derived from ice melting with complete removal of melt by specified heat fluxes on the boundary. The merits of this new model are to keep a larger temperature difference between the free surface and the ambient and hence the higher transfer rate of heat may be achieved. Also, the removal of melting ice is at its

freezing point and thus may be used as a cooling media.

The equations for estimating the mass velocity of air required for specified systems with direct in situ contact in crystal-melting operations to produce chilled air have been derived from the analysis of heat transfer coupled with the energy balance. The outlet temperature of producing chilled air has also been determined

#### 二、計劃緣由與目的

人們為了追求更高的生活品質，必然持續發展，對能源的需求也相對提高，致使各地區在尖峰時段的用電量不斷增加，造成供電系統過度負荷。許多的學者便致力於研究如何將尖峰時段所需的電力轉移至離峰時段，來平衡尖峰與離峰的用電量，儲冰釋冷(Cool-thermal storage and discharge)系統便是其中一例。

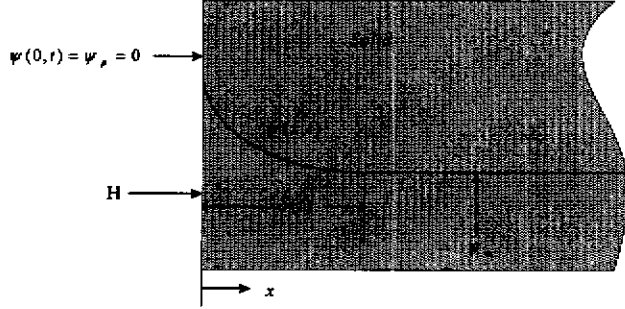
儲冰釋冷系統是利用夜間離峰時段來製冰，並在白天尖峰時間融冰以獲得釋冷空氣的方法。雖然一般的儲冰方式（動態、靜態及雪泥式儲冰系統）[1,2]不能減少能源的使用量，但是它可以降低白天尖峰時段的用電，充分利用夜晚離峰時間用電，以提高發電設施的經濟效益，在配合電力公司為積極獎勵儲存能源所制定的電價結構政策，不但可以減低因電力不足而遭現電的危機，還可以解省不少的電費。最近更有學者提出利用真空冷凍方式來儲冷[3,4]的系統，以此種方法來製冰，不但可以節省電費，更可節約能源。對於工廠利用融冰冷度釋放的原理發展儲冰是空調系統，不但可以節省電費而對冰的來源更可取用工業的廢水來製冰，減少廢水的排放，不用另外致一儲存槽以減少工廠的成本。

雖然有人利用儲冰釋冷的方式來設計空調系統，但對其理論的探討似乎稍嫌不足，目前關於冷度儲存的理論公式已有學者[5-8]作了相當的研究；而冷度釋放程序中，亦已發展出邊界給予固定熱通量來融冰的情形。

### 三、研究方法及成果

如圖(一)所示，假設半無限長的冰塊初溫為  $T_\infty$  (低於熔點  $T_p$ )，且為常數，當冰層的表面開始受熱，其溫度會隨之提昇，直到表面溫度到達冰的熔點  $T_p$  時，冰才開始融化，冰塊內部會因熱傳導而產生一溫度分佈曲線。

#### 3.1 融冰前



圖(一) 固定熱通量邊界條件於最初融冰過程之示意圖

若假設冰塊之剩餘溫度  $\psi = T - T_p$ ，則系統之統制方程式、初始條件與邊界條件如下：

$$\partial \psi / \partial t = \alpha_i (\partial^2 \psi / \partial x^2), \quad 0 \leq x \leq \delta_0 \quad (1)$$

其中  $\delta_0$  為冰將開始融化時之溫度穿透厚度。初始條件與邊界條件分別為：

$$\text{當 } t = 0, \quad \delta = 0 \quad (2)$$

$$\text{當 } x = 0, \quad -k_i \left( \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) = q \quad (3)$$

$$\text{當 } x = \delta, \quad \psi = \psi_\infty \quad (4)$$

$$\text{當 } x = \delta, \quad \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

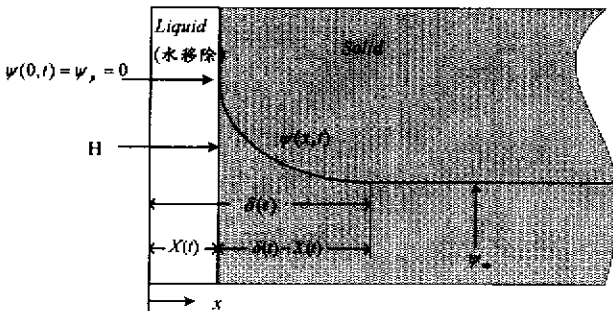
由式(1)及式(2)-(5)，可得在固定熱通量的融冰釋冷系統中，冰未融化前，冰塊表面的溫度與時間的關係

$$\psi(0, t) = \psi_\infty + \frac{q\delta}{2k_i} = \psi_\infty + \frac{q}{k_i} \sqrt{\frac{3}{2} \alpha_i t} \quad (6)$$

我們可以利用上式求出冰塊之表面溫度升高至熔點時所需的時間( $\tau$ )

$$\tau = \frac{2}{3\alpha_i} \left[ \frac{k_i}{q} (\psi_p - \psi_\infty) \right]^2 \quad (7)$$

#### 3.2 融冰後



圖(二) 固定熱通量邊界條件融冰過程之示意圖

如圖(二)所示，其統制方程式為

$$\partial \psi / \partial t = \alpha_i (\partial^2 \psi / \partial x^2), \quad X \leq x \leq \delta \quad (8)$$

其初始條件及邊界條件如下：

$$\text{當 } t = \tau, \quad X = 0 \quad (9)$$

$$\text{當 } x = X, \quad q + k_i \left( \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) = \rho Q_m \frac{dX}{dt} \quad (10)$$

$$\text{當 } x = X, \quad \psi = 0 \quad (11)$$

$$\text{當 } x = \delta, \quad \psi = \psi_\infty \quad (12)$$

$$\text{當 } x = \delta, \quad \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0 \quad (13)$$

將式(8)作積分，帶入邊界條件我們可以得到

$$\frac{d}{dt} \left[ \int_X^\delta \psi dx - \psi_\infty \delta \right] = \frac{\alpha_i q}{k_i} - \frac{\alpha_i \rho Q_m}{k_i} \frac{dX}{dt} \quad (14)$$

假設冰層溫度分佈為二次，帶入邊界條件得

$$\frac{\psi(x, t) - \psi_\infty}{-\psi_\infty} = -2 \left( \frac{x - X}{\delta - X} \right) + \left( \frac{x - X}{\delta - X} \right)^2 \quad (15)$$

將式(15)代入式(14)可得

$$\delta = \frac{3}{\psi_\infty} \left[ \left( \frac{Q_m}{c_i} - \frac{2}{3} \psi_\infty \right) X - \frac{\alpha_i q t}{k_i} \right], \quad t \geq \tau \quad (16)$$

將式(15)帶入邊界條件式(10)

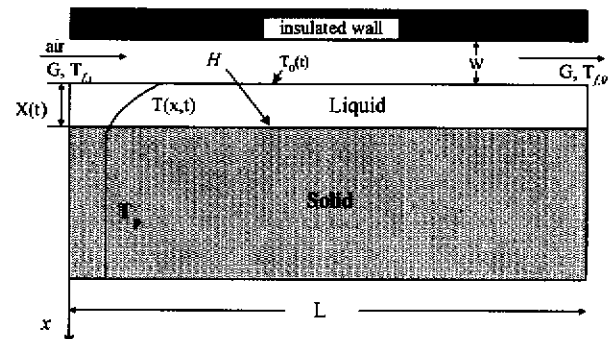
$$\frac{dX}{dt} = \frac{1}{\rho Q_m} \left( q + \frac{2k_i \psi_\infty}{\delta - X} \right) \quad (17)$$

將式(16)代入式(17)可得

$$\frac{dX}{dt} = \frac{1}{\rho Q_m} \left\{ q + \frac{2k_i \psi_\infty}{\frac{3}{\psi_\infty} \left[ \left( \frac{Q_m}{c_i} - \frac{2}{3} \psi_\infty \right) X - \frac{\alpha_i q t}{k_i} \right] - X} \right\} \quad (18)$$

利用數值方法求解式(18)可得融冰厚度與時間的關係。其中，當  $t \leq \tau$  時，冰層之表面溫度由式(15)決定；當  $t \geq \tau$  時，冰塊表面溫度為熔點  $T_p$ 。為了降低出口溫度及增加熱傳的效率固將融冰後產生的冰水移除，因此，融冰後冰塊表面溫度為熔點  $T_p$ 。因為融冰後出口溫度與融冰厚度有關，所以融冰後出口溫度會隨著融冰厚度改變。

#### 3.3 空氣的質量流速



圖(三) 空氣質量流速於固定熱通量之融冰釋冷系統示意圖

如圖(三)所示，冷空氣由於空氣流動透過無限長寬的冰層而製造，長  $L$  高  $W$ ，和  $W/L \ll 1$ 。而  $T_{f,i}$ ， $T_{f,0}$  和  $T_{f,m}$  分別表示入口溫度，出口溫度和空氣的算術平均溫度，其能量平衡方程式如下：

$$H(t) = h_m(T_{f,m} - T_0) = Gc_f(T_{f,i} - T_{f,0}) \quad (19)$$

$$T_{f,0} = T_{f,i} - H(t) / Gc_f \quad (20)$$

$$T_{f,m} = (T_{f,i} + T_{f,0}) / 2 = T_{f,i} - H(t) / 2Gc_f \quad (21)$$

$h_m$  為平均對流熱傳係數， $G$  是空氣的質量流速。因此空氣的出口溫度和算術平均溫度可從式(21)獲得，將式(21)帶入式(19)消去  $T_{f,m}$  得到

$$Nu_m = \frac{h_m D_e}{k_f} = \frac{\Theta}{1 - \Theta / (2 Re Pr)}, \quad (22)$$

其中

$$\Theta = [D_e H(t) / k_f] / (T_{f,i} - T_0) \quad (23)$$

經式(20)可得空氣的質量流速  $G(t)$  和冷空氣的出口溫度  $T_{f,0}$  如下：

$$G(t) = (\mu_f / 2(W + X(t))) \cdot Re \quad (24)$$

$$T_{f,0}(t) = T_{f,i} - \left[ \frac{H}{G(t)} \right] / c_f \quad (25)$$

### 3.4 計算範例

假設  $t_0$  為一天內的總釋冷時間。以三種不同的通入空氣溫度為例：

$$\text{Case 1- } T_{f,i,1} = 32 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (常數)}, \quad (26)$$

$$\text{Case 2- } T_{f,i,2} = 31 + 2 \sin(\pi t / t_0), \text{ } ^\circ\text{C} \quad (27)$$

$$\text{Case 3- } T_{f,i,3} = 30 + 5 \sin(\pi t / t_0), \text{ } ^\circ\text{C} \quad (28)$$

針對上面三種不同之通入空氣溫度的情況，由式(25)可求出各個出口溫度隨時間變化的情形。

### 四、結論與討論

本文以 1000、1500 與 2000  $\text{kJ/m}^2\text{-h}$  三種熱通量為例，冰塊初溫  $-20^\circ\text{C}$  為例，當冰塊尚未達到融點前，熱通量愈大則表面溫度到達  $0^\circ\text{C}$  所需的時間愈短。

本章所導出之空氣質量流速式(24)，可求得在三種不同之熱通量下空氣質量流速：融冰前，熱通量愈大，表面溫度愈高，則空氣質量流速愈高，且冰層愈早到達熔點；融冰後，熱通量愈大，由於其融冰厚度愈大，空氣質量流速慢，由式(64)得出口溫度愈低，如圖(四)所示。

利用固定熱通量融冰時，空氣質量流速與三種外界溫度的關係圖。結果發現，當冰層達到融點時，Case 3 出口溫度較高如圖(五)，這是在融點時空氣溫度已高於  $T_{f,i} = 32^\circ\text{C}$  的結果。而當冰層開始融化後，Case 3 空氣溫度逐漸低於  $T_{f,i} = 32^\circ\text{C}$ ，並且在空氣質量

流速慢，出口溫度會比其他兩種 Case 低。同理如圖(六)固定入口溫度在 Case 3 下，融冰前熱通量 ( $q = 2000 \text{ kJ/m}^2\text{-h}$ ) 是比較早達到熔點的，而融冰後出口溫度也是較低。

### 五、符號說明

$c_f$	空氣的比熱 ( $\text{kJ/kg-K}$ )
$D_e$	空氣管道的相當直徑 ( $\text{m}$ )
$G$	空氣的質量流速 ( $\text{kg/m}^2\text{-h}$ )
$h_m$	熱傳係數 ( $\text{kJ/h-m}^2\text{-K}$ )
$L$	空氣流經冰塊的長度 ( $\text{m}$ )
$q$	每小時的釋冷通量 ( $\text{kJ/m}^2\text{-h}$ )
$t$	時間 ( $\text{h}$ )
$t_0$	每天的操作時間
$T$	水或冰塊的溫度 ( $^\circ\text{C}$ )
$T_{f,i}$	空氣的入口溫度 ( $^\circ\text{C}$ )
$T_{f,0}$	空氣的出口溫度 ( $^\circ\text{C}$ )
$T_p$	冰塊的熔點 ( $^\circ\text{C}$ )
$T_0$	冰塊的表面溫度 ( $^\circ\text{C}$ )
$T_{f,m}$	空氣的算術平均溫度 ( $^\circ\text{C}$ )
$T_\infty$	冰塊的初溫 ( $^\circ\text{C}$ )
$V$	空氣的流速 ( $\text{m/sec}$ )
$W$	絕緣壁到水表面的距離 ( $\text{m}$ )
$x$	$x$ 座標 ( $\text{m}$ )
$X$	水層厚度 ( $\text{m}$ )
$Nu_m$	納塞數 ( $h_m L / k_g$ )
$Q_m$	冰塊的融化熱 ( $\text{kJ/kg}$ )

希臘符號：

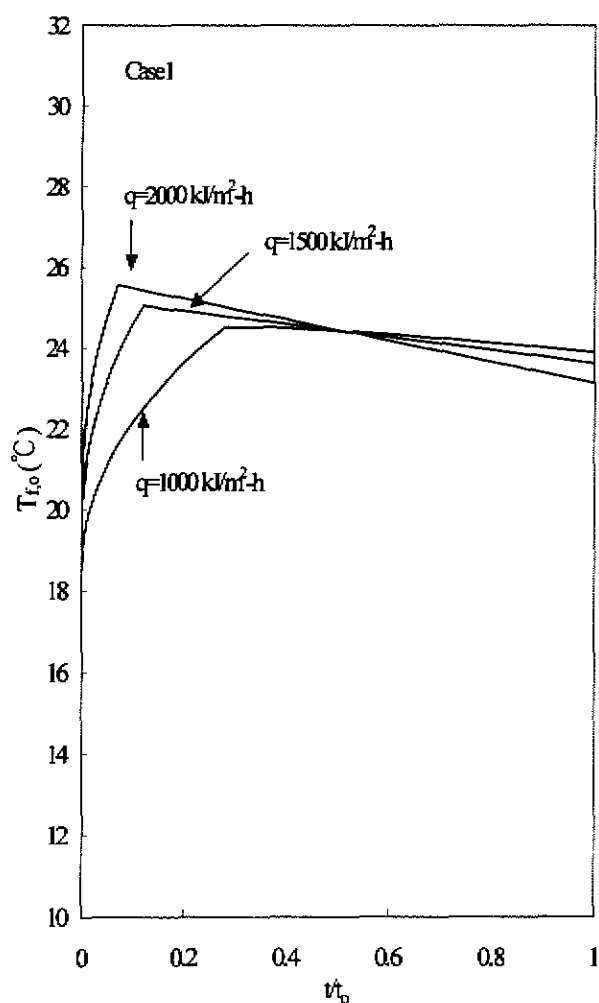
$\alpha_i$	冰的熱擴散係數 ( $\text{m}^2/\text{h}$ )
$\delta$	溫度穿透厚度 ( $\text{m}$ )
$\rho$	冰塊的密度 ( $\text{kg/m}^3$ )
$\tau$	溶冰所需的時間 ( $\text{h}$ )
$\psi$	冰的剩餘溫度 ( $^\circ\text{C}$ )
$\Theta$	由方程式(23)所定義

致謝-本研究承行政院國家科學委員會補助經費(NSC 89-2214-E-032-014)，特此致謝。

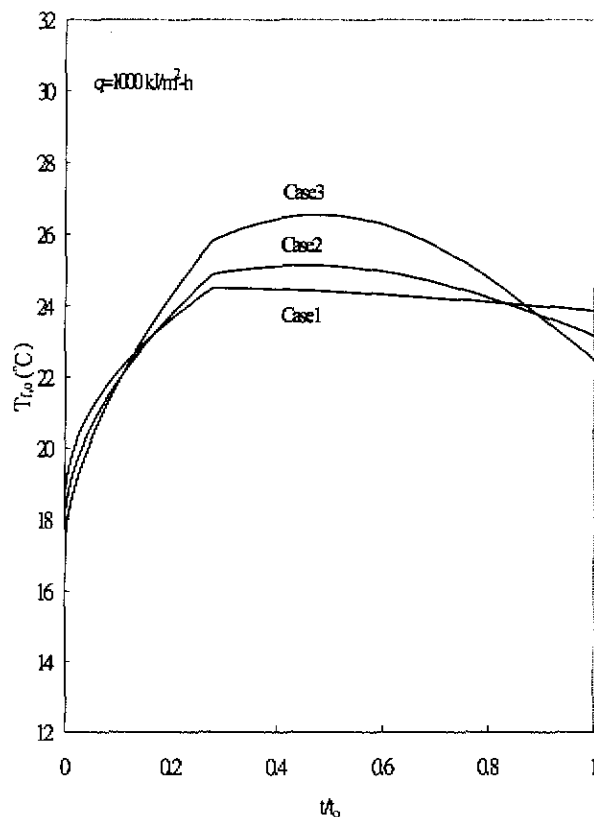
### 六、參考文獻

1. David, H. H., "DDC and Ice Thermal Storage System Provide Comfort and Energy Efficiency," ASHRAE J., Mach, 1994, 35.
2. Dorgan, C. E. and J. S. Elleson, "ASHRAE's New Design Guide For Cool Thermal Storage," ASHRAE J., May, 1994, 29.
3. Yeh, H. M. and C. Y. Cheng, "Cool Thermal Storage by Vacuum Freezing of Water," Energy-The International Journal, 1991, 16, 1045-1049.

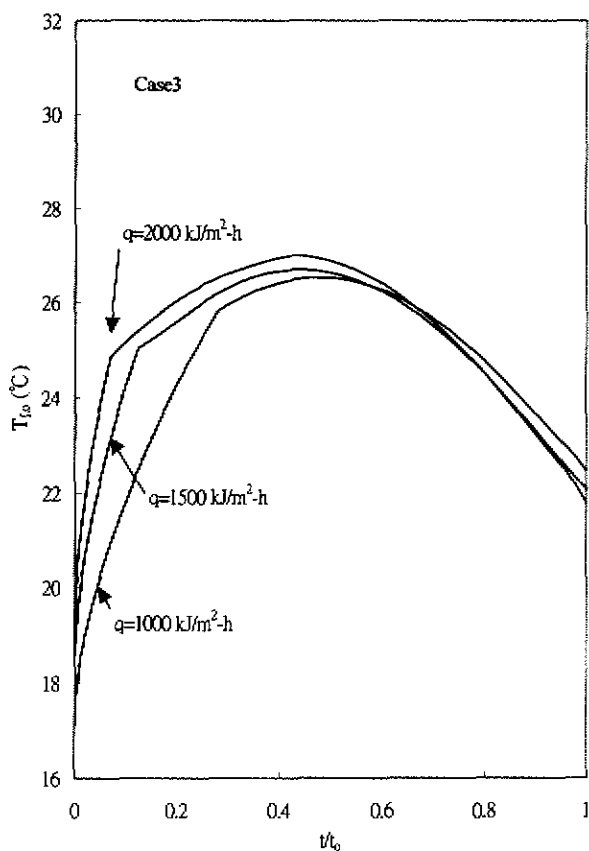
4. Yeh, H. M. and C. Y. Cheng, "Cool Thermal Storage by Vacuum Freezing Water of Water with Sublimation," *Energy Convers. Mgmt.*, 1992, 33, 51-57.
5. Yeh, Ho-Ming and Chii-Dong Ho, "Cool Thermal Discharge from Ice Melting with Specified Heat Fluxes on the Bounding", *Energy-The International Journal*, 1996, 21(6), pp. 455-461.
6. Ho, Chii-Dong, Ho-Ming Yeh and Wen-Pen Wang, "Cool Thermal Discharge Obtained with Air Flowing over Melting Ice", *Energy-The international Journal*, 1998, 23, pp. 279-288.
7. Ho, Chii-Dong, Ho-Ming Yeh and Wen-Pen Wang, "Cool Thermal Discharge with Time-Velocity Variation of Flowing Air in Situ Contact on Water Surface", *J. Chin. Inst. Chem. Engrs.*, 1998, 29, 249-255.
8. E. R. G. Eckert and R. M. Drake Jr., *Analysis of Heat and Mass Transfer*, pp. 222 -242, p777, McGraw-Hill, New York, NY (1972).



圖(四) 不同釋冷通量之出口溫度與時間之關係圖



圖(五) 出口溫度與時間之關係圖( $q=1000 \text{ kJ/m}^2\text{-h}$ )



圖(六) 不同釋冷通量之出口溫度與時間之關係圖